DOI: 10.3901/JME.2020.04.125

基于 hp 自适应伪谱法的自主泊车路径规划*

钱立军 吴 冰 仇多洋 胡伟龙

(合肥工业大学汽车与交通工程学院 合肥 230009)

摘要: 针对自主泊车路径规划最优控制问题求解收敛速率慢的问题, 提出基于 hp 自适应高斯伪谱法的自主泊车路径规划方法。首先建立车辆运动学模型, 并考虑自主泊车过程中避障约束和边界约束, 再以泊车时间最短为性能目标函数, 将自主泊车路径规划问题转化为最优控制问题。采用高斯伪谱法对最优控制问题进行离散化处理并采用序列二次规划进行求解, 在求解过程中通过动态调整网格区间个数和多项式阶数实现提高求解收敛速率。根据实际场景选取 4 种工况并进行路径规划仿真, 并将 3 种伪谱法进行对比分析, 仿真结果表明 hp 自适应高斯伪谱法能够提升自主泊车路径规划最优控制问题求解收敛速率, 同时该算法可以实现狭窄停车位内的泊车路径规划, 通过实车试验验证提出的方法获得的自主泊车路径的有效性。

关键词: 自主泊车; 路径规划; hp 自适应伪谱法; 最优控制

中图分类号: U461

Path Planning of Autonomous Parking Based on hp-adaptive Pseudospectral Method

QIAN Lijun WU Bing QIU Duoyang HU Weilong

(School of Automotive and Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract: Aiming at the problem that the convergence rate is slow when solving the optimal control problem of autonomous parking path planning, a method of autonomous parking path planning based on hp-adaptive Gauss pseudospectral method is proposed. First, the vehicle kinematical model is established, then the collision avoidance constraints and the boundary constraints in autonomous parking processes are further considered, finally the problem of autonomous parking path planning is converted into the optimal control problem which takes the shortest parking time as the cost function. The optimal control problem is discretized by Gauss pseudospectral method, and solved by sequential quadratic programming, in which the number of mesh intervals and degree of the polynomial are adjusted dynamically improving the convergence rate. According to the actual scenario, four autonomous parking conditions are designed and path planning is simulated, and three pseudospectral methods are compared and analyzed. The simulation results show that the convergence rate of the optimal control problem of autonomous parking path planning is improved by the hp-adaptive Gauss pseudospectral method, and the proposed method can obtain the parking path in a narrow parking lot, the effectiveness of the proposed method for autonomous parking path planning is verified by real vehicle tests.

Key words: autonomous parking; path planning; hp-adaptive pseudospectral method; optimal control

0 前言

随着“智能汽车创新发展战略”的提出, 智能汽车的保有量将会逐渐增加, 而智能汽车与网联技术结合也为实现“最后一公里”的低速无人驾驶提供了基础, 这可以有效解决停车难的问题, 并能提高了泊车效率和安全性, 自主泊车作为其中关键部分之一, 其研究内容包括环境感知、路径规划以及

路径跟踪控制^[1-2]。

自主泊车的路径规划作为重要技术之一, 其中包括全局路径规划和局部空间路径规划, 对此, 国内外学者已进行大量的研究, 文献[3]根据停车场环境空间约束, 提出一种以行驶时间最短的优化算法, 在不同环境中可以生成可行的路径, 文献[4]基于运动学模型得到狭窄空间内的圆弧路径, 再将多个圆弧路径连接生成一条曲率连续的路径, 文献[5-6]将路径离散化, 优化求解局部的最短路径, 最终得到全局最优路径, 文献[7]建立含避障约束、方向盘转角和转速约束等多个非线性约束函数, 以泊车结束

* 国家自然科学基金(51875149, 71431003)和安徽省高校自然科学基金(KJ2018A0782)资助项目。20190529 收到初稿, 20190916 收到修改稿

的最小车辆航向角为目标,基于B样条理论获得曲率连续的泊车路径,文献[8]在泊车过程中考虑方向盘转动过程中对泊车路径影响,提出5段式泊车路径,通过控制EPS使其匀速转动并结合避障约束求解出最优路径参数,设计车速控制系统对泊车路径进行跟踪控制,文献[9]通过考虑车位的几何约束,以最小转弯半径的圆弧曲线,并采用直线对曲线进行连接得到不同工况下的泊车路径,此种规划方法较容易实现,但获得路径的曲率较大,不利于后期的路径跟踪控制,文献[10]采用高斯伪谱法对泊车路径规划最优控制问题进行求解,得到平行泊车和垂直泊车两种场景的无碰撞可行泊车路径,该方法计算量大,面对复杂工况时会出现求解收敛速率较慢或者不收敛的现象。

为此,本文针对自主泊车路径规划最优控制问题求解收敛速率较慢的问题,提出一种基于hp自适应高斯伪谱法的自主泊车路径规划方法。首先通过建立泊车运动学模型、边界约束和路径约束,将自主泊车路径规划问题转化为以最短泊车时间为性能指标函数的最优控制问题,根据自主泊车中多种工况设置相应的边界约束,然后采用高斯伪谱法对最优控制问题进行离散化处理,结合序列二次规划对问题进行求解,通过hp自适应法调整网格区域个数和多项式阶数提高求解收敛速率。对不同的工况进行路径规划仿真分析,并将hp自适应高斯伪谱法与另外两种伪谱法求解性能进行对比分析,最后通过实车试验验证本文提出的方法获得自主泊车路径的有效性。

1 泊车路径规划模型

泊车过程是行驶车辆在空间内的避障,其障碍物主要为其他车辆、行人、道路边界和静止障碍物等。在空间障碍约束下,最优泊车路径为通过控制车速和方向盘转角使得车辆从起始位置到终止位置的过程中无碰撞发生且满足性能要求的可行路径,因此可以将自主泊车路径规划问题描述为最优控制问题。

1.1 最优控制问题

不失一般性,非线性最优控制Bolza问题可以描述为

$$\min J = \phi(\zeta(t_0), t_0, \zeta(t_f), t_f) + \int_{t_0}^{t_f} g(\zeta(t), \mu(t), t) dt \quad (1)$$

式中的系统状态变量和控制变量分别为 ζ 和 μ ,且 $\zeta(t) \in \mathbf{R}^n$, $\mu(t) \in \mathbf{R}^m$, t_0 和 t_f 分别为系统初始时刻和终止时刻。

系统状态微分方程为

$$\frac{d\zeta}{dt} = f(\zeta(t), \mu(t), t) \quad t \in [t_0, t_f] \quad (2)$$

路径约束条件为

$$C(\zeta(t), \mu(t), t) \leq 0 \quad t \in [t_0, t_f] \quad (3)$$

边界约束条件为

$$B(\zeta(t_0), t_0, \zeta(t_f), t_f) = 0 \quad t \in [t_0, t_f] \quad (4)$$

1.2 车辆运动学微分方程

车辆在整个泊车过程中车速较低,可以忽略轮胎侧滑,因此仅采用纯滚动的车辆运动学模型。根据阿克曼转向原理,如图1所示,其中 L 为车辆轴距, f 、 r 分别为车辆的前悬、后悬, d 为车辆宽度, $R(x, y)$ 为后轴中心点, v 为后轴中心点速度且方向沿车辆前进方向, O' 为瞬时转向中心, φ 为前轮等效摆角, θ 为车辆航向角, $ABCD$ 分别为车身轮廓的4个顶点。

图1 车辆运动学模型

根据车辆运动学模型可得泊车运动学微分方程如下

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v(t) \cdot \cos \theta(t) \\ \frac{dy}{dt} = v(t) \cdot \sin \theta(t) \\ \frac{dv}{dt} = a(t) \\ \frac{d\theta}{dt} = \frac{v(t) \cdot \tan \varphi(t)}{L} \\ \frac{d\varphi}{dt} = \omega(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中, a 为车辆加速度, ω 为前轮摆角角速度,在最优控制问题中, $\zeta(x, y, v, \theta, \varphi)$ 为状态变量, $\mu(a, \omega)$ 为控制变量。

除了考虑上述中的车辆运动学方程约束,还需要考虑车辆在运动过程中自身的物理条件约束以及

便于路径跟踪控制执行, 其对部分状态变量和控制变量的约束如下

$$\begin{cases} |v(t)| \leq v_m \\ |a(t)| \leq a_m \\ |\varphi(t)| \leq \varphi_m \\ |\omega(t)| \leq \omega_m \end{cases} \quad (6)$$

式中, v_m 为车辆运动的最大车速, a_m 为最大加速度, φ_m 和 ω_m 为分别为最大前轮摆角和对应的角速度。

1.3 避障约束条件

在不考虑动态障碍物情况下, 车辆在道路上行驶过程中仅需要考虑道路边界的约束, 但在泊车入库过程中还需要考虑车辆与车位前后障碍车辆之间碰撞约束。以平行泊车为例, 约束运动空间如图 2 所示, SL 、 SW 分别为道路的长度和宽度, PL 、 PW 分别为车位的长度和宽度。

图 2 平行泊车空间约束示意图

根据后轴中心点 $R(x,y)$ 可得车辆轮廓矩形 $ABCD$ 的 4 个顶点的坐标值表示如下

$$\begin{cases} A_x(t) = x(t) + (L + f) \cos \theta(t) - \frac{d}{2} \sin \theta(t) \\ A_y(t) = y(t) + (L + f) \sin \theta(t) + \frac{d}{2} \cos \theta(t) \\ B_x(t) = x(t) + (L + f) \cos \theta(t) + \frac{d}{2} \sin \theta(t) \\ B_y(t) = y(t) + (L + f) \sin \theta(t) - \frac{d}{2} \cos \theta(t) \\ C_x(t) = x(t) - r \cos \theta(t) + \frac{d}{2} \sin \theta(t) \\ C_y(t) = y(t) - r \sin \theta(t) - \frac{d}{2} \cos \theta(t) \\ D_x(t) = x(t) - r \cos \theta(t) - \frac{d}{2} \sin \theta(t) \\ D_y(t) = y(t) - r \sin \theta(t) + \frac{d}{2} \cos \theta(t) \end{cases} \quad (7)$$

若使得车辆顶点均在运动空间约束范围内, 需满足如下条件

$$\begin{cases} 0 < [Ax(t), Bx(t), Cx(t), Dx(t)] < SL \\ -PW < [Ay(t), By(t), Cy(t), Dy(t)] < SW \end{cases} \quad (8)$$

车辆在泊车过程中必须与车位前后障碍车辆之间无碰撞发生, 此约束在二维平面空间内几何意义为在任何时刻障碍物上任意一点落在车辆轮廓矩形 $ABCD$ 外, 如图 3 所示, 如果车辆在泊车过程中与 Q 点不发生碰撞, 则 Q 点坐标始终在矩形 $ABCD$ 区域外, 记矩形 $ABCD$ 四条边为直线 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 , 其直线方程如下

$$\begin{cases} L_1 = k_1 \cdot x + y_1 \\ L_2 = k_1 \cdot x + y_2 \\ L_3 = k_2 \cdot x + y_3 \\ L_4 = k_2 \cdot x + y_4 \end{cases} \quad (9)$$

式中, k_1 、 k_2 分别为直线 L_1 和 L_3 的斜率。

图 3 泊车碰撞示意图

在直线 L_1 平行或垂直 X 轴时, 若使得 Q 点在矩形 $ABCD$ 之外, Q 点坐标需要满足如下条件

$$\begin{cases} Q_x < D_x(t) \parallel Q_x > A_x(t) \\ Q_y < C_y(t) \parallel Q_y > A_y(t) \end{cases} \quad (10)$$

在直线 L_1 不平行或不垂直 X 轴时, 若使得 Q 点在矩形 $ABCD$ 之外, Q 点坐标需要满足如下条件

$$\begin{cases} (Q_y - k_1 \cdot Q_x) < y_2 \parallel (Q_y - k_1 \cdot Q_x) > y_1 \\ (Q_y - k_2 \cdot Q_x) < y_4 \parallel (Q_y - k_2 \cdot Q_x) > y_3 \end{cases} \quad (11)$$

同理对其他的碰撞点 $Q_j(x,y)$ 均需要满足以上条件, $j = 1, 2, \dots, m$, m 为碰撞点的个数。

1.4 边界约束条件

基于上述的运动学模型和约束条件, 车辆可以实现从起始时刻 t_0 到终止时刻 t_f 的无碰撞运动, 另外, 本文中仅考虑在 t_0 和 t_f 时刻车辆为静止情况, 因此边界约束条件如下

$$\begin{cases} x(t_0) = x_s; x(t_f) = x_e \\ y(t_0) = y_s; y(t_f) = y_e \\ \varphi(t_0) = \varphi_s; \varphi(t_f) = \varphi_e \\ v(t_0) = 0; v(t_f) = 0 \\ a(t_0) = 0; a(t_f) = 0 \\ \omega(t_0) = 0; \omega(t_f) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中, (x_s, y_s, φ_s) 和 (x_e, y_e, φ_e) 分别为起始时刻和终止时刻的位置和航向角信息。

1.5 性能目标函数

泊车技术解决交通问题的目标之一为快速完成泊车入位, 以减少对本车道的交通阻塞, 因此本文选用泊车完成时间为最优控制问题的性能目标函数, 综上所述, 自主泊车路径规划最优控制问题可以描述为

$$\begin{cases} \min t_f \\ \text{车辆运动学微分方程(5)} \\ \text{车辆物理特性约束(6)} \\ \text{路径约束(8)、(10)、(11)} \\ \text{边界约束(12)} \end{cases} \quad (13)$$

2 hp 自适应高斯伪谱法

高斯伪谱法是一种直接求解最优控制问题的方法, 该方法对连续的最优控制问题离散化处理并转化为非线性规划问题进行求解^[11]。在面对复杂问题时约束条件增多, 最优控制问题变得不光滑导致求解速度也逐渐下降, 因此在求解过程中通过动态调整网格区间个数和多项式阶数以达到快速收敛的目的^[12]。

2.1 时域变换

将最优控制问题的整个时域 $t \in [t_0, t_f]$ 分成 n 段, 即 $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_n = t_f$, 由此每段时间域 $t^{(p)}$ 的步长为

$$\Delta t = t_n - t_{n-1} \quad (14)$$

伪谱法中配置点的区间为 $\tau \in [-1, 1]$, 因此通过时域变换将变量 t 转换为变量 τ , 转换如下

$$\tau = \frac{2\Delta t - t_n - t_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} \quad \tau \in [\tau_0, \tau_f] \quad (15)$$

由式(15)可以将 Bolza 问题转化为标准问题, 对于每个时间域 $t^{(p)}$, 最优控制问题描述如下

$$J^{(p)} = \Phi^{(p)}(\zeta^{(p)}(\tau_0), t_0, \zeta^{(p)}(\tau_f), \tau_f) +$$

$$\begin{cases} \frac{\Delta t}{2} \int_{\tau_0}^{\tau_f} g(\zeta^{(p)}(\tau), \mu^{(p)}(\tau), \tau) d\tau \\ \frac{d\zeta^{(p)}}{d\tau} = \frac{\Delta t}{2} f(\zeta^{(p)}(\tau), \mu^{(p)}(\tau), \tau) \\ \text{s.t.} \begin{cases} C(\zeta^{(p)}(\tau), \mu^{(p)}(\tau), \tau) \leq 0 \\ B(\zeta^{(p)}(\tau_0), t_0, \zeta^{(p)}(\tau_f), \tau_f) = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (16)$$

2.2 变量离散化

在伪谱法中控制变量和状态变量均需要在配置点位置上离散化, 然后在配置点上构建拉格朗日插值函数逼近原函数, 在区间 $[\tau_0, \tau_f]$ 上, 以 N 阶的 Legendre 多项式的零点为配置点, 其多项式为

$$P_N(\tau) = \frac{1}{2^N \cdot N!} \frac{d^N}{d\tau^N} \left[(\tau^2 - 1)^N \right] \quad (17)$$

在每个 $t^{(p)}$ 时间域中, 状态变量和控制变量分别由多项式近似表示为

$$\zeta^{(p)}(\tau) \approx \Gamma^{(p)}(\tau) = \sum_{i=0}^N L_i^{(p)}(\tau) \cdot \Gamma^{(p)}(\tau_i) \quad (18)$$

$$\mu^{(p)}(\tau) \approx M^{(p)}(\tau) = \sum_{i=0}^N \tilde{L}_i^{(p)}(\tau) \cdot M^{(p)}(\tau_i) \quad (19)$$

式(18)、(19)中, Lagrange 插值基函数分别表示为

$$L_i^{(p)}(\tau) = \prod_{j=0, j \neq i}^N \frac{\tau - \tau_j^{(p)}}{\tau_i - \tau_j^{(p)}} \quad (20)$$

$$\tilde{L}_i^{(p)}(\tau) = \prod_{j=1, j \neq i}^N \frac{\tau - \tau_j^{(p)}}{\tau_i - \tau_j^{(p)}} \quad (21)$$

为了将运动学微分方程约束转换为代数约束, 需要对状态变量进行求导并离散化, 由式(18)求导可以得到在 $\tau = \tau_k$ 点的状态变量导数可近似表示为

$$\frac{d\zeta^{(p)}(\tau_k)}{dt} \approx \sum_{i=0}^N \frac{dL_i^{(p)}(\tau_k)}{dt} \cdot \Gamma^{(p)}(\tau_i) \quad (22)$$

结合式(16)和(22)可以得到代数约束为

$$\begin{aligned} & \sum_{i=0}^N \frac{dL_i^{(p)}(\tau_k)}{dt} \cdot \Gamma^{(p)}(\tau_i) - \\ & \frac{\Delta t}{2} f(\Gamma(\tau_k), M(\tau_k), \tau_k) = 0 \end{aligned} \quad (23)$$

离散后的路径约束和边界约束分别表示为

$$C(\Gamma^{(p)}(\tau_k), M^{(p)}(\tau_k), \tau_k) \leq 0 \quad (24)$$

$$B(\Gamma^{(1)}(\tau_0), \Gamma^{(N)}(\tau_f), \tau_f) = 0 \quad (25)$$

由于泊车过程中需要满足状态变量的连续性,

因此在相邻时间域的连接点处需要满足如下条件

$$\Gamma^{(p-1)}(\tau_f) = \Gamma^{(p)}(\tau_0) \quad (26)$$

在 Legendre-Gauss 配置点中不包含终端时刻状态值, 根据式(26)和 Legendre-Gauss 型求积公式求出, 终端时刻状态值可以表示为

$$\Gamma^{(p-1)}(\tau_f) \approx \Gamma^{(p-1)}(\tau_0) + \frac{\Delta t}{2} \sum_{k=0}^N A_k f_k \quad (27)$$

式中, A_k 为高斯积分权重系数, 可以表示为

$$A_k = \frac{2}{(1-\tau_k^2)(\dot{P}_N(\tau_k))^2} \quad k=1,2,\dots,N-1 \quad (28)$$

经过上述离散化过程, 可以将自主泊车路径规划的最优控制问题转化为非线性规划问题, 可以采用序列二次规划、罚函数法等最优化方法对非线性规划问题进行求解, 本文采用序列二次规划方法。hp 自适应伪谱法要求状态变量在时间域内以及相邻时间域的连接点处保持连续, 因此能够保证获得的路径满足车辆运动特性约束, 且可有效避免在路径跟踪控制过程中因执行系统无法满足要求而导致跟踪失败。

2.3 hp 自适应更新算法

hp 自适应伪谱法需要在每个时间域内计算出最大误差 $\varepsilon_m^{(s)}$, 并与给定的阈值 $\bar{\varepsilon}$ 比较, 如果最大误差 $\varepsilon_m^{(s)}$ 大于 $\bar{\varepsilon}$, 则需要增加划分区间个数 K 和多项式阶数 P 来提高近似精度。

每个时间域 $[\tau_0, \tau_f]$ 内, 根据 Legendre-Gauss 型求积公式, 在采样点上精确值与近似值的误差为

$$\begin{aligned} e &= \|y(\tau) - Y(\tau)\| = \\ &= \left\| \sum_{i=0}^{\infty} a_i P_i(\tau) - \sum_{i=0}^{\infty} \tilde{a}_i P_i(\tau) \right\| = \\ &= \left\| \sum_{i=N+1}^{\infty} a_i P_i(\tau) + \sum_{i=0}^N (a_i - \tilde{a}_i) P_i(\tau) \right\| \leq \\ &= \left\| \sum_{i=N+1}^{\infty} a_i P_i(\tau) \right\| \end{aligned} \quad (29)$$

式中, $P_i(\tau)$ 为 $N+1$ 次的 Legendre 多项式, 根据 Legendre 多项式在区间 $[\tau_0, \tau_f]$ 的正交性可得

$$\langle P_m, P_n \rangle = \int_{\tau_0}^{\tau_f} P_m(\tau) P_n(\tau) d\tau = \frac{2}{2n+1} \delta_{mn} \quad (30)$$

$$\text{式中, } \delta_{mn} = \begin{cases} 1 & m=n \\ 0 & m \neq n \end{cases}$$

由此可以得到

$$e < \left\| \sum_{i=N+1}^{\infty} a_i P_i(\tau) \right\| < \left[\sum_{i=N+1}^{\infty} \frac{2}{2i+1} a_i^2 \right]^{1/2} <$$

$$\left[\sum_{i=N+1}^{\infty} a_i^2 \right]^{1/2} = \frac{c 10^{-\sigma(N+1)}}{\sqrt{1-10^{-2\sigma}}} \quad (31)$$

式中, σ 为误差的衰减率, c 为常数。

由式(18)可得到 Lagrange 系数 a_i , 表示如下

$$\begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_0(\tau_1) & P_1(\tau_1) & \cdots & P_N(\tau_1) \\ P_0(\tau_2) & P_1(\tau_2) & \cdots & P_N(\tau_2) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ P_0(\tau_{N+1}) & P_1(\tau_{N+1}) & \cdots & P_N(\tau_{N+1}) \end{pmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} Y(\tau_1) \\ Y(\tau_2) \\ \vdots \\ Y(\tau_{N+1}) \end{pmatrix} \quad (32)$$

结合式(31)和(32)可计算得到误差的衰减率 σ 。

如果 $\sigma > \bar{\sigma}$, 则需要增加多项式阶数 P , $\bar{\sigma}$ 为设定的衰减率阈值, 由式(31)可知在时间域内的最大误差表示为

$$e_c^{(s)} = \frac{c 10^{-\sigma(N_c^{(s)}+1)}}{\sqrt{1-10^{-2\sigma}}} \quad (33)$$

时间域内在增加配点数后, 得到新误差表示为

$$e_n^{(s)} = \frac{c 10^{-\sigma(N_n^{(s)}+1)}}{\sqrt{1-10^{-2\sigma}}} \quad (34)$$

由式(33)和(34)可得, 增加多项式阶次 P 后的配点数为

$$N_n^{(s)} = \left\lceil N_c^{(s)} + \frac{\lg(e_c^{(s)}/e_n^{(s)})}{\sigma} \right\rceil \quad (35)$$

式中, $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整运算符

如果 $\sigma < \bar{\sigma}$, 表明误差收敛较慢, 需要重新划分时间域, 划分得到新区间的配点数与之前相同, 其划分的区间个数 K 表示为

$$K = \left\lceil 1 + \frac{\lg(e_c^{(s)}/e_n^{(s)})}{N_c^{(s)} \bar{\sigma}} \right\rceil \quad (36)$$

3 仿真实例及分析

本文通过匝道变道、路口转弯、平行泊车和垂直泊车 4 种场景以验证采用 hp 自适应伪谱法规划自主泊车路径有效性。通过 MATLAB/Simulink 搭建仿真平台, 采用某小型 SUV 为研究对象, 车辆参数及运动学约束参数设置如表 1 所示。

表1 车辆参数和物理约束

参数	数值
车辆轴距 L / m	2.560
车辆前悬 f / m	0.902
车辆后悬 r / m	0.883
车身宽度 d / m	1.765
最大行驶车速 v_m / (m/s)	3.0
最大加速度 a_m / (m/s ²)	0.75
最大前轮摆角 φ_m / rad	0.56
最大前轮摆角角速度 ω_m / (rad/s)	0.56

(1) 匝道变道工况。在进入停车场时存在匝道场景,此工况下设定单车道的宽度为4.0 m,选(1,6)为后轴中心点的起始位置,终止条件为车辆进入另一车道并且后轴中心点处于车道中线上,起始位置和终止位置的车身均为水平状态,由图4和图5可知,车辆在变道的过程中无碰撞发生,状态变量和控制变量均满足约束条件。

图4 匝道变道工况路径示意图

图5 匝道变道工况变量

(2) 路口转弯工况。在停车场内存在路口转弯工况,本文设定车辆左转弯且只能在本车道行驶,因此车道的宽度同样为4.0 m,选(-8,0)为后轴中心点的起始位置,终止条件为车辆进入另一车道并且后轴中心点处于车道中线上,起始位置车身为水平状态,终止位置车身为垂直状态,由图6和图7可知,车辆在转弯的过程中无碰撞发生,且状态变量

和控制变量均满足约束条件。

图6 路口转弯工况路径示意图

图7 路口转弯工况参变量

(3) 平行泊车工况。平行泊车工况选择两种不同大小车位进行仿真,此工况下设定车道的宽度为4.0 m,车位的宽度为2.5 m,工况1和工况2车位长度分别为6.5 m和4.78 m,车辆在起始位置和终止位置车身均为水平状态。工况1中选(8.5,1.5)为后轴中心点的起始位置,由图8和图9可知,车辆在泊车的过程中无碰撞发生,且状态变量和控制变量均满足约束条件,车辆进入泊车位后经过一次前进调整完成泊车。工况2中的起始位置同工况1,由图10可知,车辆在泊车的过程中无碰撞发生,车辆进入车位内后经过多次前进和后退调整完成泊车。由图11可知,其状态变量满足约束条件,但部分控制变量未满足,车辆在车位内部调整时,前轮摆动角速度超过最大值的约束限制,这由于车位过于狭窄导致车辆出现原地转向的现象。

图8 平行泊车工况1路径示意图

图9 平行泊车工况1变量

图10 平行泊车工况2路径示意图

图11 平行泊车工况2变量

(4) 垂直泊车工况。与平行泊车工况类似, 垂直泊车工况也选择两种不同大小车位进行仿真, 由于垂直泊车运动过程中的车身航向角变化较大, 因此比平行泊车需要更宽的道路空间。设定车道的宽度为 4.5 m, 车位的深度为 5 m, 工况 1 和工况 2 车位宽度分别为 3.5 m 和 1.95 m, 起始位置和终止位置车身分别为水平状态和垂直状态, 分别选(5.0,1.5)和(-4.0,1.5)为后轴中心点的起始位置, 由图 12~15 可知, 车辆在泊车过程中进行若干次前进和后退调整完成泊车, 无碰撞发生且状态变量和控制变量均满足约束条件, 无原地转向的现象。对比两个工况, 在工况 1 中, 车辆分别在车位内外各进行一次调整, 而在工况 2 中, 车辆的调整均在车位外部, 这是因为工况 1 的车位较宽, 而工况 2 的车位狭窄导致车位无法在车位内部进行车身姿态的调整, 这也与日常人工泊车的过程类似。

图12 垂直泊车工况1仿真结果示意图

图13 垂直泊车工况1变量

图14 垂直泊车工况2路径示意图

图15 垂直泊车工况2变量

为了对比不同伪谱法的优化性能效果, 对平行泊车工况 2 分别采用全局 p 法、分段 h 法和 hp 自适应法进行泊车路径规划问题求解, 选取不同误差精度时的优化结果如表 2 所示。

由表 2 可知, 在误差精度要求较低时, 三种方法的配点数和求解速度差异不明显, 但在精度要求

表 2 不同伪谱法优化性能结果比较

误差 ε	方法	区间数	配点数	误差/ 10^{-5}	计算时间/s
10^{-3}	p	1	45	85.325 1	5.934 1
	h	10	40	62.497 8	5.502 7
	hp	10	40	62.513 7	5.718 3
10^{-4}	p	1	185	14.733 1	16.452 7
	h	16	64	18.290 4	7.329 0
	hp	10	50	9.818 3	6.985 7
10^{-6}	p	1	—	—	—
	h	38	152	0.824 7	12.397 2
	hp	17	85	0.618 2	9.2627 8

较高时, p 法因配点增加过多导致最优控制问题求解不收敛, 无法得到最优解, h 法和 hp 法配点数都有增加, 但 hp 法通过增加多项式阶次使得区间个数增加较少, 配点数相对 h 法也较少, 优化求解速度也优于另外两种方法。

4 实车试验

试验车采用上述仿真中某小型 SUV, 由 12 个超声波雷达完成对试验车周围环境的探测, 采用 GPS 和惯导一体式导航系统对试验车进行定位, 通过轮速传感器获得车轮转动的脉冲数, 对试验车执行部件控制系统进行线控改制, 包括转向系统、制动系统、动力系统和挡位系统, 分别实现转向、车速和挡位的控制。自主开发泊车控制器, 通过 CAN 总线与各传感器和执行系统控制器进行通信, 泊车控制器根据采集的车位信息进行泊车路径规划并控制执行系统进行泊车路径跟踪, 试验车系统组成如图 16 所示。

图 16 试验车平台架构示意图

本文选取园区内停车场作为试验场地, 为了在停车场进行自主泊车的路径规划, 首先通过采集停

车场卫星地图和 GPS 定位数据, 并进行网格划分建立停车场栅格地图, 再根据栅格地图数据进行自主泊车的路径规划, 如图 17 所示, 以停车场入口 A 点作为泊车起始位置, 分别选取 B 和 C 两个垂直泊车位作为泊车终止位置。

图 17 停车场泊车路径示意图

根据本文所提出的方法得到整个时间域 $[t_0, t_f]$ 内车辆状态变量信息 $S(x, y, v, \theta, \varphi)$, 将此信息作为路径跟踪控制的目标输入。如图 18 所示, 以目标车速和目标方向盘转角作为开环控制中控制量直接作用于车辆, 对于车辆在行驶过程中会存在位置偏差和车辆航向角度偏差, 采用对目标位置和目标车辆航向角分别做跟踪闭环控制, 并都以方向盘转角为控制量输出, 将开环控制与闭环控制相结合对自主泊车路径进行跟踪控制。

图 18 路径跟踪控制框图

在实车试验时, 采用路径预瞄-跟随模型对位置偏差进行跟踪, 另外避免因车身角度与目标角度偏差过大导致车辆与障碍物发生碰撞, 因此对车身目标航向角进行跟踪, 两者均以方向盘转角为输出控制变量, 分别取权重为 0.5。在泊车过程中实际路径以及与目标路径的侧向偏差如图 19 所示, 车辆均可完成泊车且过程中无碰撞发生。从图 19b 可以看出, 在车辆转弯时产生侧向偏差较大, 其最大值为 0.149 1 m, 在直线道路行驶时, 由于方向盘转角较小, 产生的侧向偏差较小。在临近泊车位至完成垂直泊车过程中, 虽然方向盘转向角度较大, 但由于车速较低, 车辆产生的侧向偏差任较小。实车试验表明, 根据本文提出的规划算法获得的路径满足自主泊车要求且可有效地指导路径跟踪控制。

图 19 自主泊车实车试验结果

5 结论

(1) 针对自主泊车路径规划最优控制问题求解收敛速率较慢的问题, 提出基于 hp 自适应伪谱法的自主泊车路径规划方法。通过建立车辆运动学模型、边界约束和路径约束, 将自主泊车路径规划问题转换为最优控制问题, 并以车辆泊车时间最短为性能目标函数。

(2) 根据实际场景选取 4 种工况进行路径规划仿真, 仿真结果表明每种工况下, 在车辆的行驶过程中无碰撞发生, 并且该算法可以实现在狭窄空间内的泊车路径规划。获得的路径较为平滑, 因此有利于路径跟踪控制, 可以提高泊车成功率。

(3) 通过对 3 种伪谱法的比较, hp 自适应高斯伪谱法根据对误差衰减率的判断对区间个数和多项式阶数进行自适应调整, 可以有效解决 p 法增加过多配点和 h 法过于细化网格导致求解速度慢或不收敛的情况。

(4) 在实车试验中, 车辆在泊车过程中无碰撞发生, 实践表明, 通过本文提出的方法获得的路径可以为自主泊车提供有效参考路径。

参 考 文 献

[1] 李志强, 戴一凡, 李升波, 等. 智能网联汽车(ICV)技术的发展现状及趋势[J]. 汽车安全与节能学报, 2017, 8(1): 1-14.

LI Keqiang, DAI Yifan, LI Shengbo, et al. Intelligent connected vehicle(ICV) technology development status and trends[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2017, 8(1): 1-14.

[2] 陈虹, 郭露露, 边宁. 对汽车智能化进程及其关键技术的思考[J]. 科技导报, 2017, 35(11): 52-59.

CHEN Hong, GUO Lulu, BIAN Ning. On automobile intelligentization and key technologies[J]. Science & Technology Review, 2017, 35(11): 52-59.

[3] KWON H, CHUNG W. Performance analysis of path planners for car-like vehicles toward automatic parking control[J]. Intelligent Service Robotics, 2014, 7(1): 15-23.

[4] VOROBIEVA H, GLASER S, MINOIU-ENACHE N, et al. Automatic parallel parking in tiny spots: path planning and control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(1): 396-410.

[5] ZIPS P, BÖCK M, KUGI A. Optimisation based path planning for car parking in narrow environments[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2016, 79: 1-11.

[6] 陈荣华, 王可心, 邵之江. 自主泊车的全联立动态优化方法[J]. 控制理论与应用, 2016, 33(5): 561-568.

CHEN Ronghua, WANG Kexin, SHAO Zhijiang. Simultaneous dynamic optimization for autonomous parking[J]. Control Theory & Applications, 2016, 33(5): 561-568.

[7] 李红, 王文军, 李志强. 基于 B 样条理论的平行泊车路径规划[J]. 中国公路学报, 2016, 29(9): 143-151.

LI Hong, WANG Wenjun, LI Keqiang. Path planning for parallel parking based on B spline[J]. Theory China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(9): 143-151.

[8] 钱立军, 胡伟龙, 刘庆, 等. 多段式自动泊车路径规划及其关键技术[J]. 吉林大学学报, 2016, 46(3): 785-791.

QIAN Lijun, HU Weilong, LIU Qing, et al. Multiple segment method for automatic parking path planning and its key technology[J]. Journal of Jilin University, 2016, 46(3): 785-791.

[9] 江浩斌, 沈峥楠, 马世典, 等. 基于信息融合的自动泊车系统车位智能识别[J]. 机械工程学报, 2017, 53(22): 125-133.

JIANG Haobin, SHEN Zhengnan, MA Shidian, et al. Intelligent identification of automatic parking system based on information fusion[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(22): 125-133.

[10] 叶林铨, 祝辉, 梅涛. 基于伪谱法的自主泊车路径规划方法[J]. 计算机工程, 2017, 43(2): 33-37.

YE Linquan, ZHU Hui, MEI Tao. Autonomous parking path planning method based on pseudospectral method[J]. Computer Engineering, 2017, 43(2): 33-37.

[11] 刘英杰, 赵又群, 许健雄, 等. 基于 Gauss 伪谱法的紧

急避让汽车操纵逆动力学[J]. 机械工程学报, 2012, 48(22): 127-132.

LIU Yingjie, ZHAO Youqun, XU Jianxiong, et al. Vehicle Handling inverse dynamics based on Gauss pseudospectral method while encountering emergency collision avoidance[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(22): 127-132.

- [12] LIU Fengjin, WILLIAM H, RAO ANIL V. Adaptive Mesh Refinement method for optimal control using decay rates

of Legendre polynomial coefficients[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017(99): 1-9.

作者简介: 钱立军, 男, 1962 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为新能源汽车, 智能网联汽车技术。

E-mail: qianlijun66@163.com

吴冰(通信作者), 男, 1986 年出生, 博士研究生。主要研究方向为智能辅助驾驶技术。

E-mail: hfutwubing@126.com